

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.04.012

## 适用于大断面马头门掘进的 超前致裂分区爆破技术\*

汪禹<sup>1,2</sup>, 崔正荣<sup>1,2</sup>, 王小兵<sup>1,3</sup>, 李龙福<sup>1,3</sup>, 詹思博<sup>1,3</sup>, 章结传<sup>1,2</sup>

1. 金属矿山安全与健康国家重点实验室, 马鞍山 243000;
2. 马鞍山矿山研究院 爆破工程有限责任公司, 马鞍山 243000;
3. 中钢集团 马鞍山矿山研究总院股份有限公司, 马鞍山 243000)

**摘要:** 为确保大断面立井马头门施工质量, 并降低爆破对立井马头门产生的损伤与破坏, 提出了一种立井大断面马头门掘进的超前致裂分区爆破技术。根据某地下矿山立井马头门设计断面及工程地质条件, 将-199.5 m、-258.2 m等马头门掘进断面划分为上分层、中分层、下分层等, 施工顺序为: 上分层→中分层→下分层。首先沿各分层开挖轮廓线施工超前致裂孔, 其孔深为马头门掘进深度, 超前致裂孔采用间隔装药, 并先于主爆区起爆, 实现孔间相互贯通。其次, 沿各立井马头门开挖轮廓线形成“减震沟”, 降低爆破地震波的传播。马头门各施工区域设置逐孔微差起爆, 间隔时间为5~20 ms, 实现分段爆破振动的干扰、抵消, 降低爆破对大断面马头门的影响。各马头门开挖轮廓线半壁孔率达95%以上, 既能满足大断面马头门破碎岩体掘进中对控制顶板成型质量的要求, 又降低了支护、喷浆等成本支出, 实现错峰降振。大断面马头门掘进的超前致裂分区爆破技术可为类似立井马头门施工作业提供一定指导建议。

**关键词:** 马头门; 分区施工; 超前致裂孔; 数码电子雷管; 爆破振动; 微差间隔

**中图分类号:** TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)04-0089-07

## Advance Crack Zone Blasting Technology Suitable for Large Section Horsehead Gate Excavation

WANG Yu<sup>1,2</sup>, CUI Zheng-rong<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-bing<sup>1,3</sup>, LI Long-fu<sup>1,3</sup>, ZHAN Si-bo<sup>1,3</sup>, ZHANG Jie-chuan<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Safety and Health for Metal Mines, Maanshan 243000, China;
2. Maanshan Institute of Mining Research Blasting Engineering Co., Ltd., Maanshan 243000, China;
3. Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Co., Ltd., Maanshan 243000, China)

**Abstract:** In order to ensure the construction quality of large section shaft horsehead gate and reduce the damage caused by blasting, an advance crack zone blasting technology is put forward. According to the section design and engineering geological conditions, the section of Matoumen excavation, the gates at -199.5 m and -258.2 m of a certain underground mine are divided into upper layer, middle layer, and lower layer excavation zones. The construction sequence is: upper layer→middle layer→lower layer. Firstly, the advanced fracturing holes should be constructed along the excavation contour lines of each layer. The hole depth is equal to the driving depth of the horsehead gate. They are charged with decks and detonated before the main blasting area, which can achieve mutual penetration between

收稿日期 (Date of reception): 2023-04-23

网络首发日期 (Published online): 2023-08-14

作者简介: 汪禹 (1992-), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生、工程师, 主要从事采矿及爆破技术研究, (E-mail) 1527578674@qq.com。

基金项目: “十四五”国家重点研发计划课题-深部厚大矿体大参数高效连续开采技术 (\*2022YFC2904101)

**About the author:** WANG Yu (1992-), male, born in Chuzhou, Anhui province, graduate student, engineer, mainly engaged in mining and blasting technology research, (E-mail) 1527578674@qq.com.

**Fund Programs:** “14th Five-Year” National Key R&D Program-Large parameter efficient continuous mining technology for deep thick and large ore body (\*2022YFC2904101)

holes. The "shock absorption ditch" shall be formed along the excavation contour lines of the horsehead gate, which can reduce the effect of blasting seismic wave propagation. Besides, each construction area of the horsehead gate is equipped with hole by hole millisecond delay detonations with an interval of 5 ~ 20 ms, which can achieve the interference and offset of the vibrations from the subsequent blasting and reduce the blasting impact on the large cross-section horsehead gate. It has been validated that the half-wall hole rate of the excavation contour line is higher than 95%. It can not only meet the requirements of controlling the quality of roof forming for the excavation of large cross-section gate in broken rock mass, but also reduce the cost of support and shotcrete.

**Key words:** horsehead gate; partition construction; advanced fracture hole; electronic detonator; blasting vibration; millisecond delay

随着经济建设对资源需求量的增加,浅部矿产资源已逐渐趋向枯竭,国内外大多数矿山相继进入深部资源开采,地下矿山所需井筒的深度也随之加深。井筒是连接地表与井下作业现场的安全通道,承担人员、材料、设备运输等任务。当立井井筒设计深度达到矿产资源储存位置后,立井井筒预留出口与各中段巷道所连接处称为“马头门”,其位处矿井的咽喉部位,并承担各中段水平风流系统、人员(材料、矿产资源)上下等工作。“马头门”设计断面大,处立体交叉位置,其在矿山建设期和生产期是否稳定,直接影响矿井的安全生产<sup>[1]</sup>。

立井马头门地处深部,具有应力集中、受力状态复杂等特点,如其施工及支护方案缺乏全面的理论指导,易造成马头门结构变形破坏。采用传统钻爆法施工时,未提前将马头门施工区域与被井筒保护区域进行分割,造成马头门断面成型质量及爆破振动较难控制,易对马头门产生影响甚至损伤。诸多专家学者开展了相关试验研究工作,陈峥等开展了地铁竖井自下往上全断面破除马头门和从上往下分台阶破除马头门施工方法研究<sup>[2]</sup>,结果表明:分台阶破除法相较于全断面破除法节约7 d工期。王洪森等对马头门车场巷道上层和下层贯通区进行爆破作业<sup>[3]</sup>。陈轲等针对复杂地质条件下立井马头门施工<sup>[4]</sup>,提出了地质雷达物探、超前小导管注浆、锚网喷、反底拱、U型钢拱架以及混凝土砌衬等综合治理技术。针对立井马头门施工难点,上述研究仅提出了在特定条件下马头门施工工艺,未对马头门混凝土段及基岩段爆破施工提出相关针对性措施。

如何采取有效措施保障井筒内保留混凝土结构的安全,成为立井马头门施工中亟待解决的重要课题。由于立井所处区域工程地质、水文地质复杂,如采用常规爆破法施工马头门,易造成井筒混凝土开裂、变形等,对后期井筒内设施安全运行产生一定影响。若采用机械破碎法施工立井马头门,施工效率低、成本高。选用合理的爆破方案设计,来控制大断面马头门成型及爆破振速是该工程的难点,为此本

项目提出了超前致裂分区爆破技术,提前对马头门掘进开挖区划分为若干分层,沿各分层开挖轮廓线施工超前致裂孔,提前形成了“减震沟”,对提高立井马头门整体稳定性起到积极作用。

## 1 工程概况

某铁矿风井井筒净直径6 m,井深400 m(不含井底水窝1.3 m),井口标高+12 m(目前封口盘标高+8 m),井底标高-388.0 m。井筒采用全深冻结法施工,冻结深度408 m,井筒掘进深度395.73 m(自地表标高+6.43 m起至井底水窝)。方案设计马头门有-199.5 m、-258.2 m、-317.5 m、-378.0 m水平,其中马头门水平筋、墙部竖筋、拱部环筋、铺底钢筋均采用 $\phi 22$  mm,间排距均为250 mm,搭接长度为770 mm;混凝土强度等级均为C30,抗渗等级为P8。

根据钻探资料及土工、岩石试验结果并参照物探测井资料,风井井筒所处工程地质条件以粉质黏土、安山岩、角砾岩、膏化凝灰岩等为主,风化程度为强风化-微风化,RQD值为2~75,坚硬程度等级为软岩~较软岩,围岩类别为IV~V级,工程地质条件属复杂类型。根据井筒施工期间所揭露的围岩情况显示,各层马头门工程地质条件如表1所示。立井马头门掘砌工程是矿井建设施工中重要的环节,须严格管控施工质量,需要针对风井各马头门掘进施工段进行控制爆破。

## 2 超前致裂分区爆破技术机理分析

所谓超前致裂分区爆破技术,就是在立井马头门爆破开挖轮廓线上布置超前致裂孔(减震孔);参考文献[5-9]提出:沿被保护设施周边区域开挖“减震沟”或“减震孔”,可降低爆破振动对保护设施的损伤及破坏。相对于爆区、被保护区对象而言,“减震沟”或“减震孔”很小,可看作非完全固结界面。应力波在介质界面上的入射、反射如图1所示。

表 1 各马头门工程地质条件

Table 1 Engineering geological conditions of the horsehead gate

孔号	马头门标高/m	断面尺寸/m <sup>2</sup>	基岩岩性	基岩结构	基岩构造	基岩主要成分	基岩水文地质
1	-199.5	5.7×5.4	中风化膏化凝灰岩	凝灰结构	块状构造	石英、粘土	弱富水性含水层
2	-258.2	5.7×5.4	磁铁矿	细粒结构	块状构造	矿物为磁铁矿	弱富水性含水层
3	-317.5	5.7×5.4	凝灰岩	凝灰结构	块状构造	凝灰岩	中等富水性含水层
4	-378.0	5.7×5.4	角砾状灰岩	灰岩结构	块状构造	泥晶灰岩	中等富水性含水层

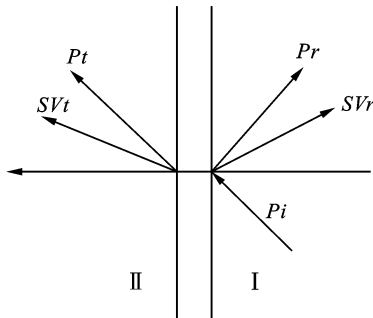


图 1 应力波入射、透射及反射图  
Fig. 1 The incidence, transmission and reflection of stress wave

图 1 中:  $P$ 、 $SV$  分别代表应力波中纵波和横波, 下标  $i$ 、 $t$ 、 $r$  分别代表入射波、透射波、反射波; 因界面无明显裂缝, 故界面是连续的, 则有

$$\begin{cases} \sigma_{zz}(I) = \sigma_{zz}(II) = \sigma_{zz} \\ \sigma_{zx}(I) = \sigma_{zx}(II) = \sigma_{zx} \end{cases} \quad (1)$$

根据节理刚度的定义, 有如下

$$\begin{cases} u_z(I) - u_z(II) = \frac{\delta_{zz}}{Kn} \\ u_x(I) - u_x(II) = \frac{\sigma_{zx}}{Ks} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\delta$ 、 $u$  分别为应力和位移;  $z$  和  $x$  分别为坐标方向;  $I$  为减震孔的入射侧岩体;  $II$  为减震孔折射侧岩体;  $Kn$  为减震孔的法向刚度;  $Ks$  为减震孔的切向刚度。

界面上的应力可由虎克定律计算得出

$$\begin{cases} \delta_{zz} = \lambda \frac{\partial \mu_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial \mu_x}{\partial z} \\ \delta_{zx} = \mu\lambda \left( \frac{\partial \mu_x}{\partial z} + \frac{\partial \mu_x}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为拉梅系数;  $\mu$  为泊松比;  $\mu_x$  为  $x$  方向的位移函数。

经计算, 应力波反射系数  $\lambda_{ir}$ 、透射系数  $\lambda_{it}$  均  $\leq 1$ , 说明应力波通过“超前致裂孔”时有明显的降震作用, 其降震效果大小与超前致裂孔周围的岩石波阻抗有关<sup>[5-9]</sup>。当节理刚度无穷大时, 此时入射应力波完全透射, 超前致裂孔的孔径几乎为零, 即相当于此处岩体是完整的。透射波振幅与孔面的节理刚度

有关。超前致裂孔每隔几个孔进行装药爆破(空孔起导向作用), 超前致裂孔间相互贯通, 相当于“减震沟”, 把爆破地震波完全隔断。

参考文献[10-13]指出: 如大断面一次爆破开挖, 装药量大会存在强烈的爆破振动效应, 易对邻近设施产生危害效应; 针对大断面断面爆破难以控制问题, 提出掘进作业面分区的爆破方案设计方法, 划分为上分层、下分层等。采用微差分区爆破情况下, 各个方向上减振效果均比较明显, 尤其是对于近距离减振, 减振效率大致在 80% 以上<sup>[14]</sup>, 并可控制井筒混凝土爆破振动安全允许速度小于 2.0 cm/s。基于数码电子雷管精确延时控制, 通过设置合适的孔间微差间隔时间, 采用逐孔起爆技术, 能够实现分段振动干扰相互抵消, 实现错峰降振<sup>[15]</sup>。

### 3 爆破技术方案设计

为提高马头门循环进尺, 降低爆破振动对井筒混凝土危害, 设计采用超前致裂分区爆破技术。根据表 1 所示, 风井 -199.5 m、-258.2 m 等水平马头门设计断面尺寸为 5.7 m × 5.4 m, 掘进深度为 3.5 m, 属大断面开挖。该技术思路: 根据马头门高度, 划分为三个施工层, 设计上分层高度为 2.0 m, 中分层、下分层高度为 1.7 m, 施工顺序为: 上分层 → 中分层 → 下分层。在施工各分层时, 沿分层开挖轮廓线施工超前致裂孔, 分阶超前致裂孔每隔 3 个孔进行装药爆破, 实现开挖区域混凝土与保留处井壁混凝土“提前分离”。分区及超前致裂孔布置如图 2 所示。

设计马头门掘进深度为 3.5 m, 其中各分层混凝土段掘进长度为 0.5 m, 基岩段掘进长度为 3.0 m。考虑到马头门基岩段工程地质条件较复杂, 马头门混凝土段布置了水平筋、竖筋, 拟对每施工层划分三个阶段掘进施工, 一阶掘进深度为 0.5 m(破碎混凝土、割除钢筋), 二阶掘进深度为 1.5 m, 三阶掘进深度为 1.5 m。为提高立井马头门施工效率, 并降低掘进成本, 提前实现马头门上部顶板与下部待开挖混凝土(岩体)的分离, 超前致裂孔一次性施工(设计孔深为 3.5 m), 孔内分阶间隔装药(往炮孔

内填塞炮泥控制各阶掘进炮孔深度,并根据孔深调整装药量)。超前致裂孔间距上部拱顶段为  $100 \pm 50$  mm,直墙段(底部)段为  $150 \pm 50$  mm。各分层各阶段掏槽孔、辅助孔布置,根据工程地质条件及时优化、调整。

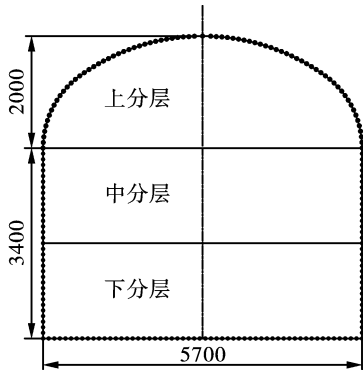


图 2 马头门分区布置(单位:mm)

Fig. 2 Partition layout of horsehead gate(unit:mm)

### 3.1 上分层爆破方案

#### 3.1.1 混凝土段

上分层混凝土段设计掘进高度 2000 mm,宽度 5700 mm,深度 500 mm。炮孔施工采用 YT-28 型气腿式风动凿岩机,人员在井筒内吊盘下层盘施工,并做好防坠措施。本阶段施工超前致裂孔共计 77 个,孔径为 42 mm。超前致裂孔每隔 3 个孔进行间隔装药,其中未装药空孔对爆炸裂纹扩展具有导向作用<sup>[15]</sup>,形成“减震沟”,易控制马头门顶板成型质量,避免顶板超、欠挖。

为便于施工方便,设计采用直眼掏槽,并在掏槽孔周边均匀分布 6 个空孔(为掏槽孔创造自由面,孔径为 60 mm),空孔与掏槽孔间距为 150 mm。掏槽孔、辅助孔炮孔设计深度为 0.4 m,炮孔直径  $d = 42$  mm,掏槽炮孔选用直眼掏槽。辅助孔的布置遵循使炸药的爆破能量均匀分布的原则,分布在掏槽孔和超前致裂孔之间,孔间距为  $400 \pm 50$  mm,排距

为  $400 \pm 50$  mm。上分层混凝土段一阶炮孔设计布置参数见图 3,炮孔施工完成图见图 4。

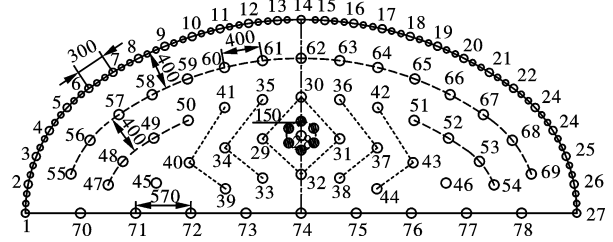


图 3 上分层混凝土段一阶炮孔布置图(单位:mm)

Fig. 3 Blast hole design of upper layered concrete section(unit:mm)



图 4 炮孔施工完成图

Fig. 4 Blast hole construction

混凝土段爆破参数见表 2,掏槽孔深 0.4 m,其余孔深 0.3 m,掏槽孔、辅助孔角度均为  $90^\circ$ ,各装药炮孔做好填塞。炸药采用 1 号岩石乳化炸药,规格为 0.3 kg/卷,药卷长度为 0.3 m;采用数码电子雷管,设计超前致裂孔、掏槽孔、辅助孔等逐孔微差间隔起爆,降低同段一次齐发总药量。参考文献[16-18]指出:炮孔间延期时间间隔为 20 ~ 25 ms,可取得良好的降振效果;考虑超前致裂孔(装药)间距较小,设计超前致裂孔时间间隔为 5 ms;掏槽孔间距较小,设计掏槽孔时间间隔为 5 ms;辅助孔间距较大,设计辅助孔时间间隔为 15 ~ 20 ms。

表 2 上分层混凝土段爆破参数

Table 2 Blasting parameters of upper layered concrete section

名称	炮孔编号	孔深/m	孔数	单孔药量/kg	总药量/kg	起爆时间/ms	备注
超前致裂孔(装药)	1 ~ 27	0.5	27	0.10	2.70	0 ~ 130	间隔 5 ms
掏槽孔 -1	28	0.4	1	0.20	0.20	140	/
掏槽孔 -2	29 ~ 32	0.4	4	0.15	0.60	145 ~ 160	间隔 5 ms
辅助孔 -1	33 ~ 38	0.3	6	0.15	0.90	170 ~ 245	间隔 15 ms
辅助孔 -2	39 ~ 44	0.3	6	0.15	0.90	250 ~ 350	
辅助孔 -3	45 ~ 46	0.3	2	0.15	0.90	360 ~ 380	
辅助孔 -4	47 ~ 54	0.3	8	0.15	1.20	390 ~ 530	间隔 20 ms
辅助孔 -5	55 ~ 69	0.3	15	0.1	1.50	540 ~ 820	
底孔	70 ~ 78	0.3	9	0.15	1.95	830 ~ 950	间隔 15 ms
合计			78		10.85		

3.1.2 基岩段

基岩段掘进深度为 3.0 m,设计二阶掘进、三阶掘进深度均为 1.5 m。爆破参数基本一致,在此仅论述上分层基岩段二阶(三阶)掘进爆破参数。炮孔施工采用 YT-28 型气腿式风动凿岩机,作业人员在井筒内吊盘下层盘施工掏槽孔、辅助孔及底板孔。炮孔直径为 42 mm,掏槽孔设计深度为 1.7 m,辅助孔设计深度为 1.5 m;掏槽炮孔选用楔形掏槽,掏槽孔与自由面夹角为 82°,辅助孔角度均为 90°,各装药炮孔做好填塞。上分层基岩段二阶炮孔布置如图 5,爆破参数见表 3。

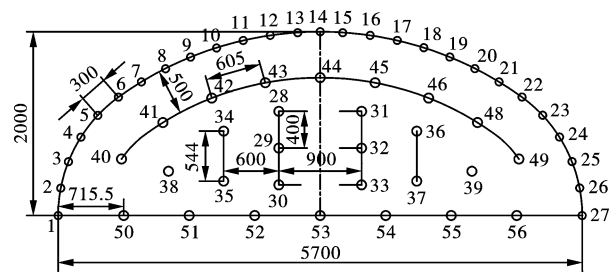


图 5 上分层基岩段二阶炮孔布置图(单位:mm)

Fig. 5 Blast hole layout diagram of upper layered bedrock section(unit:mm)

表 3 上分层基岩段二阶爆破参数

Table 3 Blasting parameters of upper layered bedrock section

名称	炮孔编号	孔深/m	孔数	单孔药量/kg	总药量/kg	起爆时间/ms	备注
超前致裂孔(装药)	1~27	1.5	27	0.30	8.1	0~130	间隔 5 ms
掏槽孔	28~33	1.7	6	0.75	4.5	140~165	间隔 5 ms
辅助孔-1	34~37	1.5	4	0.60	2.4	170~230	
辅助孔-2	38~39	1.5	2	0.45	0.9	240~260	间隔 20 ms
辅助孔-3	40~49	1.5	10	0.45	4.5	270~450	
底孔	50~56	1.5	7	0.60	4.2	460~550	间隔 15 ms
合计			56		24.6		

3.2 中分层(下分层)爆破方案

根据马头门高度,划分为三个施工层,施工顺序为:上分层→中分层→下分层。待上分层施工到位(掘进深度 3.5 m),再进行中分层(下分层)施工。马头门掘进段中分层、下分层段高均为 1.7 m,爆破参数基本一致,因论文篇幅有限,减少过多赘述,本文仅论述中分层掘进爆破方案。

3.2.1 混凝土段

中分层混凝土段设计掘进高度 1700 mm,宽度 5700 mm,深度 500 mm。炮孔施工采用 YT-28 型气腿式风动凿岩机,人员在井筒内吊盘下层盘施工,并做好防坠措施。本阶段施工超前致裂孔共计 34 个,孔径 42 mm,孔距 300 mm,孔深 0.5 m(孔内间隔装药)。

因上部已有自由面,中分层(下分层)不再布置掏槽孔,设计炮孔直径为 42 mm,辅助孔炮孔设计深度为 0.4 m,辅助孔角度均为 90°,辅助孔的布置遵循使炸药的爆破能量均匀分布的原则,孔间距为 570 ± 50 mm,排距为 400 ~ 450 ± 50 mm。中分层混凝土段一阶炮孔布置如图 6,爆破参数见表 4。

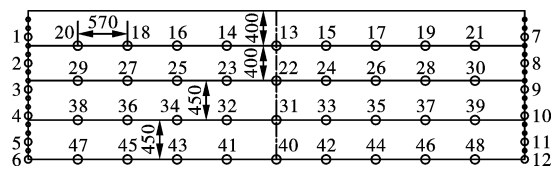


图 6 中(下)分层混凝土段一阶炮孔布置图(单位:mm)

Fig. 6 Blast hole layout of middle(lower) layered concrete section(unit:mm)

表 4 中(下)分层混凝土段一阶爆破参数

Table 4 Blasting parameters of middle(lower) layered concrete section

名称	炮孔编号	孔深/m	孔数	单孔药量/kg	总药量/kg	起爆时间/ms	备注
超前致裂孔(装药)	1~12	0.5	12	0.10	1.2	0~55	间隔 5 ms
辅助孔-1	13~21	0.4	9	0.20	1.8	60~220	
辅助孔-2	22~30	0.4	9	0.20	1.8	230~390	间隔 20 ms
辅助孔-3	31~39	0.4	9	0.20	1.8	400~560	
底孔	40~48	0.4	9	0.20	1.8	570~730	间隔 15 ms
合计			48		8.4		

### 3.2.2 基岩段

基岩段掘进长度为 3.0 m,划分为二阶掘进深度为 1.5 m,三阶掘进深度为 1.5 m。超前致裂孔(装药)前期已施工,孔距 300 mm,孔深 1.5 m(孔内间隔装药)。炮孔施工采用 YT-28 型气腿式风动凿岩机,人员在井筒内吊盘下层盘施工辅助孔及底板孔。因上部已有自由面,中分层(下分层)不再布置掏槽孔,炮孔直径为 42 mm,辅助孔炮孔设计深度为 1.5 m,辅助孔角度均为 90°,辅助孔的布置遵循使炸药的爆破能量均匀分布的原则,孔间距为  $712.5 \pm$

50 mm,排距为  $550 \sim 600 \pm 50$  mm。基岩段井壁炮孔布置如图 7,爆破参数见表 5。

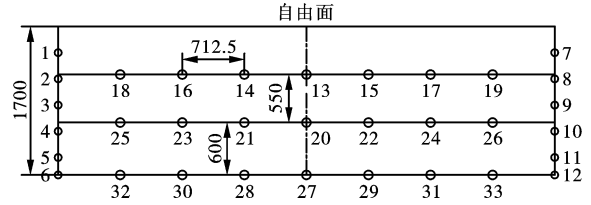


图 7 中(下)分层基岩段二阶炮孔布置图(单位:mm)

Fig. 7 Blast hole layout diagram of middle(lower) layered bedrock section(unit:mm)

表 5 中(下)分层基岩段二阶爆破参数表

Table 5 Blasting parameter table of middle layer(lower layer) bedrock section

名称	炮孔编号	孔深/m	孔数	单孔药量/kg	总药量/kg	起爆时间/ms	备注
超前致裂孔(装药)	1~12	1.5	12	0.3	3.6	0~55	间隔 5 ms
辅助孔-1	13~19	1.5	7	0.6	4.2	60~180	间隔 20 ms
辅助孔-2	20~26	1.5	7	0.6	4.2	190~310	
底板孔	27~33	1.5	7	0.6	4.2	320~410	间隔 15 ms
合计		48			16.2		

### 3.3 爆破效果分析

立井马头门掘砌工程是矿井建设施工中重要的环节,须严格管控施工质量。如采用爆破法施工立井马头门,易造成井筒混凝土开裂、变形等,故未开展相关常规爆破试验。新爆破技术方案确定后,为评价新爆破设计参数的合理性,分别进行 -199.5 m、

-258.2 m、-317.5 m、-378 m 马头门掘进施工作业,各马头门爆破施工指标见表 6,部分爆破效果如图 8 所示。可见,爆后的马头门顶板巷道成型质量较高,可明显地看出炮孔半孔痕,有利于控制顶板岩石的冒落以及维护围岩的完整性,从而有利于充分发挥围岩自身的承载能力。

表 6 各马头门爆破施工指标

Table 6 Lithological parameters of the horsehead gate and chamber

孔号	马头门标高/m	总孔数/个	总装药量/kg	炸药单耗/(kg·m <sup>-3</sup> )	拱部眼痕率/%	巷道成型质量	掘进周期/d	备注
1	-199.5	376	216.0	1.34	95.5	良好	6.0	基岩段岩性较差,局部破碎,辅助孔数量增加
2	-258.2	395	204.3	1.26	95.8	良好	6.1	
3	-317.5	335	246.9	1.53	97.7	良好	5.8	基岩段岩性较稳固,辅助孔数量数量减少
4	-378.0	323	243.3	1.51	98.6	良好	5.7	

综合分析表 6、图 8 可知:

(1)各马头门开挖轮廓线半壁孔率达 95% 以上,能满足大断面马头门破碎岩体掘进中对控制顶板成型质量的要求。

(2)设计超前致裂孔时间间隔为 5 ms,掏槽孔时间间隔为 5 ms,辅助孔时间间隔为 15~20 ms;选用数码电子雷管,实现各分层各阶逐孔微差间隔起爆。根据萨道夫斯基公式<sup>[19]</sup>,可计算出单段最大药量所产生的爆破振动速度小于《爆破安全规程》<sup>[20]</sup>所规定的数值(2.0 cm/s),满足安全要求。

(3)由于炮孔数量布置较多,大块数量有所减

少,提高了井筒出矸效率。



(a) 上分层施工情况 (a) Construction situation of upper layer  
(b) 中分层(下分层)施工情况 (b) Construction situation of middle layer (lower layer)

图 8 各分层爆后效果

Fig. 8 Blasting effects of each layer

## 4 结论

针对大断面立井马头门施工特点,提出了超前致裂分区爆破技术,并根据马头门掘进爆破施工情况,得出如下结论。

(1)马头门掘进施工区域划为三个施工层,设计上分层高度为2.0 m,中分层、下分层高度为1.7 m,施工顺序为:上分层→中分层→下分层。在施工各分层时,沿分层开挖轮廓线施工超前致裂孔,实现了开挖区域混凝土与保留处井壁混凝土“提前分离”。

(2)新方案在穿孔、装药上耗时更长。-199.5 m、-258.2 m水平基岩段岩性较差,局部破碎,采用多打孔少装药方法,增加了辅助孔数量,施工工期有所增加。-317.5 m、-378.0 m施工正常,断面成型质量符合设计要求。降低了支护、喷浆等成本支出。

(3)通过数码电子雷管,可实现逐孔微差间隔起爆,能实现分段振动干扰相互抵消,实现错峰降振。因井筒内无法布置监测设备,未能对各马头门爆破振动情况检测,仅根据萨道夫斯基公式计算爆破振动数值;后续类型马头门施工,定制测振仪防护装置,开展相关监测工作。

### 参考文献 (References)

- [1] 周瑞鹤. 煤矿立井马头门施工围岩应力场时空演化规律及稳定性研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2022.
- [1] ZHOU Rui-he. Study on spatio-temporal evolution law of surrounding rock stress field and stability in ingate construction of vertical shaft in coal mine [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [2] 陈 峥,张越博,孙伟帅,等. 超深圆形竖井大断面横通道马头门破除施工技术研究[C]//2022年工业建筑学术交流论文集,2022:1348-1351.
- [2] CHEN Zheng, ZHANG Yue-bo, SUN Wei-shuai, et al. Research on the constriction technology of breaking down the horsehead gate with large section of ultra deep circular shaft [C] // 2022 Symposium on Industrial Architecture, 2020:1348-1351. (in Chinese)
- [3] 王洪森,颜事龙,郭子如,等. 井底车场与副井马头门贯通控制爆破技术[J]. 煤炭科学技术,2012,40(5):24-26.
- [3] WANG Hong-sen, YAN Shi-long, GUO Zi-ru, et al. Study of Influence of stemming length on cutting blasting effect in tunnel excavation [J]. Coal Science and Technology, 2012,40(5):24-26. (in Chinese)
- [4] 陈 轲,苗 涛,郝洪声. 异常复杂地质条件下井筒马头门掘进与支护技术[J]. 现代矿业,2020,618(10):72-74.
- [4] CHEN Ke, MIAO Tao, HAO Hong-sheng. Excavation and support technology of shaft ingate under abnormal complex geological conditions [J]. Modern Mining, 2020, 618(10):72-74. (in Chinese)
- [5] 黎 罡. 工程爆破中减震孔的隔震机理与效果研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2014.
- [5] LI Gang. The study of vibration isolation mechanism and effect of damping hole in blasting [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014. (in Chinese)
- [6] 谭用星. 爆破振动对混凝土结构影响及防护方法研究[D]. 武汉:长江科学院,2011.
- [6] TAN Yong-xing. Study on the effect of blasting vibration on concrete structures and its protection methods [D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute, 2011. (in Chinese)
- [7] 郭 涛,毛益明,杨 力,等. 减振沟对爆破振动加速度峰值减振效应的试验研究[J]. 工程爆破,2010,16(2):76-79.
- [7] GUO Tao, MAO Yi-ming, YANG Li, et al. Experimental study on vibration reduction effect of vibration reduction ditch on peak acceleration of blasting vibration [J]. Engineering Blasting, 2010, 16(2):76-79. (in Chinese)
- [8] 丁安松. 爆破减振沟的机理研究及工程应用[D]. 湘潭:湖南科技大学,2020.
- [8] DING An-song. Mechanism research and engineering application of blasting vibration reduction ditch [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [9] 王 璞,陈志刚,张道振,等. 市区复杂环境下深基坑开挖控制爆破[J]. 工程爆破,2010,16(1):35-39.
- [9] WANG Pu, CHEN Zhi-gang, ZHANG Dao-zhen, et al. Controlled blasting for deep foundation pit excavation under complex urban conditions [J]. Engineering Blasting, 2010, 16(1):35-39. (in Chinese)
- [10] 李龙福,方建国,汪禹,等. 分次分段掘进爆破技术在复杂破碎岩体中的应用[J]. 金属矿山,2022,51(4):79-83.
- [10] LI Long-fu, FANG Jian-guo, WANG Yu, et al. Application of staged excavation blasting technology in complex broken rock mass [J]. Metal Mine, 2022, 41(4):79-83. (in Chinese)

- umn [J]. China Journal of Highway and Transportation, 2017, 30(9): 51-60. (in Chinese)
- [8] 孙珊珊,赵均海,张常光. 爆炸荷载下钢管混凝土墩柱柱面压力分布研究[J]. 爆破, 2018, 35(2): 12-18.
- [8] SUN Shan-shan, ZHAO Jun-hai, ZHANG Chang-guang. Research on column pressure distribution of concrete-filled steel tube pier under Explosion Load [J]. Blasting, 2018, 35(2): 12-18. (in Chinese)
- [9] ECHEVARRIA A, ZAGHI A E, CHIARITO V, et al. Experimental comparison of the performance and residual capacity of CFFT and RC bridge columns subjected to blasts[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(1): 4015026.
- [10] 亨利奇,著. 熊建国,译. 爆炸动力学及其应用[M]. 北京:科学技术出版社,1987.
- [10] HENRYCH. Translated by XIONG Jian-guo. Explosion dynamics and its application [M]. Beijing: Science and Technology Press, 1987. (in Chinese)
- [11] 高轩能,刘颖,王书鹏. 基于 LS-DYNA 的大空间柱壳结构爆炸波压力场分析[J]. 振动与冲击, 2011(9): 70-75.
- [11] GAO Xuan-neng, LIU Ying, WANG Shu-peng. Analysis of explosive shock wave pressure distribution on large-space cylindrical reticulated shell based on LS-DYNA [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011(9): 70-75. (in Chinese)
- [12] 卢志芳,刘沐宇. 不同爆炸荷载下长江隧道的动力响应和损伤分析[J]. 爆破, 2013, 30(3): 5-9.
- [12] LU Zhi-fang, LIU Mu-yu. Analysis of dynamic response and structure damage of Yangtze River Tunnel subjected to different explosion loading [J]. Blasting, 2013, 30(3): 5-9. (in Chinese)

英文编辑:李立峰

(上接第95页)

- [11] 陈文尹. 分区组合爆破在硬岩暗挖地铁站中的应用[J]. 工程爆破, 2017, 23(1): 85-88.
- [11] CHEN Wen-yin. Partition combination blasting applied in hard rock underground excavation in metro station [J]. Engineering Blasting, 2017, 23(1): 85-88. (in Chinese)
- [12] 赵文清,苏晖,李嘉庚,等. 大断面隧道爆破方案分区设计及其振动规律研究[J]. 铁道建筑技术, 2023, 23(1): 1-5.
- [12] ZHAO Wen-qing, SU Hui, LI Jia-geng. Partition combination blasting applied in hard rock underground excavation in metro station [J]. Railway Construction Technology, 2023, 23(1): 1-5. (in Chinese)
- [13] 王 硕. 特殊不良地质条件下隧道控制爆破技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2020.
- [13] WANG Shuo. Study on technology of controlled blasting in tunnel construction under special unfavorable geological conditions [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [14] 钟冬望,何理,操鹏,等. 基于精确毫秒延时控制的爆破降振试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S1): 107-112.
- [14] ZHONG Dong-wang, HE Li, CAO Peng, et al. Experimental study of reducing vibration intensity based on controlled blasting with precise time delay [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 107-112. (in Chinese)
- [15] 蒲传金,杨鑫,肖定军,等. 爆炸荷载下双孔裂纹扩展的数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(15): 300-311.
- [15] PU Chuan-jin, YANG Xin, XIAO Ding-jun, et al. Numerical simulation of double-hole crack propagation under explosion load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(15): 300-311. (in Chinese)
- [16] 张西良,仪海豹,韩寒,等. 延时间隔对爆破破岩的影响机制及应用研究[J]. 金属矿山, 2022, 51(7): 73-79.
- [16] ZHANG Xi-liang, YI Hai-bao, HAN Han, et al. Influence mechanism and application of delay interval on rock breaking by blasting [J]. Metal Mine, 2022, 51(7): 73-79. (in Chinese)
- [17] 王雁冰,王国豪,鲍舟琦,等. 基于数码电子雷管的岩巷爆破掘进炮孔密度优化方法[J]. 金属矿山, 2023, 52(5): 113-121.
- [17] WANG Yan-bing, WANG Guo-hao, BAO Zhou-qi, et al. Optimization method of hole density in rock tunnel blasting with digital electronic detonator [J]. Metal Mine, 2023, 52(5): 113-121. (in Chinese)
- [18] 崔立明,隋湘滨,周义德. 数码电子雷管在预裂爆破中的应用研究[J]. 工程爆破, 2022, 28(4): 108-112.
- [18] CUI Li-ming, SUI Xiang-bin, ZHOU Yi-de. Study of digital electronic detonators used in pre-splitting blasting [J]. Engineering Blasting, 2022, 28(4): 108-112. (in Chinese)
- [19] 闫常陆,王峰. 基于萨道夫斯基公式拟合的爆破振动规律研究[J]. 现代矿业, 2018, 590(6): 109-111.
- [19] YAN Chang-lu, WANG Feng. Study on blasting vibration regularity based on Sadov's formula fitting method [J]. Modern Mining, 2018, 590(6): 109-111. (in Chinese)
- [20] 中国工程爆破协会. GB 6722—2014 爆破安全规程[M]. 北京:中国标准出版社, 2014.

英文编辑:陈东方